

1.1 - INTRODUÇÃO

A disciplina Fenômenos de Transporte está estabelecida no currículo mínimo do MEC para os cursos de Engenharia.

No curso de Engenharia de Civil da UNITEP, a disciplina visa fornecer noções gerais e está dividida em: Conceitos; Análise Dimensional; Transporte de Energia Térmica e Mecânica dos Fluidos.

1.2 - FLUIDO

Fluido é toda substância que muda de forma, quando submetido a esforços tangenciais. Todos os fluidos são amorfos, isto é, não têm forma própria e sim a do recipiente que os contém.

1.3 - TENSÃO DE CISALHAMENTO

Considerando a superfície dada na fig. 1.1, a força \vec{F} pode ser decomposta nas componentes: normal \vec{F}_n e tangencial \vec{F}_t . Se a superfície dada tem área "A", define-se Tensão de Cisalhamento " τ " como a relação entre a componente tangencial e a área da superfície.

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad (1.1)$$

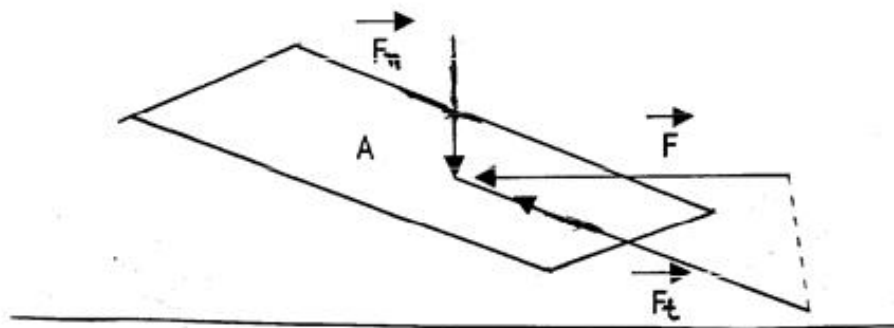


Figura 1.1 - Tensão de Cisalhamento e Pressão

1.4 - PRESSÃO

Na figura 1.1, define-se Pressão “ p ” como a relação entre a componente normal e a área da superfície.

$$p = \frac{\vec{F}_n}{A} \quad (1.2)$$

1.5 - ESFORÇOS NOS LÍQUIDOS

Os líquidos em repouso, só admitem esforços normais à superfície. Nos líquidos em movimento, além dos esforços normais, surgem também os esforços tangenciais ou de cisalhamento.

A tensão de cisalhamento não deve ser confundida com a pressão, pois se originam de forças diferentes, uma tangencial e outra normal, embora as duas grandezas representem uma força por unidade de área.

1.6 - SISTEMAS DE UNIDADES

São normalmente empregadas as unidades de dois sistemas:

- SISTEMA INTERNACIONAL (SI) : que tem como grandezas primárias, a Massa (M), o Comprimento (L) e o Tempo (T).
- SISTEMA TÉCNICO (SI) : que tem como grandezas primárias, a Força (F), o Comprimento (L) e o Tempo (T).

O quadro 1.1 (pág. 3) apresenta as grandezas mais usuais, com as equações dimensionais, nos dois sistemas.

1.7 - PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

1.7.1 - MASSA ESPECÍFICA OU DENSIDADE ABSOLUTA: “ ρ ”

É a relação entre a massa do fluido e a unidade de volume.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (1.3)$$

Unidades: - SI : kg/m³
- ST : kgf.s²/m⁴

QUADRO 1.1 - UNIDADES USUAIS

Grandezas	Sistema Técnico		Sistema Internacional	
	Eq. Dimensional	Unidades	Eq. Dimensional	Unidades
M	$FL^{-1}T^2$	kgf.s ² /m	M	kg
F	F	kgf	MLT^{-2}	N(Newton)
L	L	m	L	m
T	T	s	T	s
V	LT^{-1}	m/s	LT^{-1}	m/s
a	LT^{-2}	m/s ²	LT^{-2}	m/s ²
ρ	$FL^{-4}T^2$	kgf.s ² /m ⁴	ML^{-3}	kg/m ³
γ	FL^{-3}	kgf/m ³	$ML^{-2}T^{-2}$	N/m ³
p	FL^{-2}	kgf/m ²	$ML^{-1}T^{-2}$	N/m ² (Pascal)
Q	L^3T^{-1}	m ³ /s	L^3T^{-1}	m ³ /s
T _R	FL	kgf.m	ML^2T^{-2}	N/m (J= Joule)
P	FLT^{-1}	kgf.m/s	ML^2T^{-3}	J/s (W= Watt)
μ	$FL^{-2}T$	kgf.s/m ²	$ML^{-1}T^{-1}$	kg/s.m
v	L^2T^{-1}	m ² /s	L^2T^{-1}	m ² /s
σ	FL^{-1}	kgf/m ⁻¹	MT^{-2}	N/m
Ω	T ⁻¹	rad/s	T ⁻¹	rad/s
e	L	m	L	m
τ	FL^{-2}	kgf/m ²	$ML^{-1}T^{-2}$	N/m ²

Obs.: 1N = 0,102 kgf

1.7.2 - PESO ESPECÍFICO: “ γ ”

É a relação entre o peso do fluido e a unidade de volume.

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volume}} \quad (1.4)$$

Unidades: -SI : N/m³
-ST : kgf/m³

Alguns valores do peso específico:

ÁGUA:

$\gamma_{H_2O} = 1.000 \text{ kgf/m}^3$ ou 9.810 N/m^3 , que se referem a água à 4°C ; salvo menção em contrário, esses valores serão sempre considerados nesta disciplina, independentemente da temperatura.

MERCÚRIO:

$\gamma_{Hg} = 13.600 \text{ kgf/m}^3$ ou 133.416 N/m^3

DERIVADOS DE PETRÓLEO:

γ varia de 750 à 850 kgf/m^3

1.7.3 - RELAÇÃO ENTRE O PESO ESPECÍFICO E A MASSA ESPECÍFICA:

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1.5)$$

onde “g” é a aceleração da gravidade e vale $9,81 \text{ m/s}^2$

1.7.4 - DENSIDADE RELATIVA: “d”

$$d = \frac{\rho_{\text{FLUIDO}}}{\rho_{H_2O}} \quad \text{OU} \quad d = \frac{\gamma_{\text{FLUIDO}}}{\gamma_{H_2O}} \quad (1.6)$$

1.7.5 - COMPRESSIBILIDADE:

É a propriedade que em maior ou menor grau, possuem os fluidos de sofrerem redução de volume, quando sujeitos a esforços de compressão.

A variação de volume dv , é proporcional ao produto do volume inicial e a variação da pressão.

Assim pode-se escrever:

$$dv \propto v \cdot dp \quad (1.7)$$

onde “v” é o volume inicial e “dp” é a variação da pressão. Pode-se substituir a proporcionalidade por igualdade, desde que se multiplique o segundo membro da

equação 1.7 por uma constante, assim:

$$dv = K \ v \ dp \quad (1.8)$$

onde K é a constante, também denominada coeficiente de compressibilidade. Da equação 1.8, pode-se deduzir que:

$$K = \frac{dv}{v \ dp} \quad (1.9)$$

Define-se MÓDULO VOLUMÉTRICO “ ε ” por:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \quad (1.10)$$

A partir das equações 1.9 e 1.10, pode-se escrever:

$$\varepsilon = \frac{v \ dp}{dv} \quad (1.11)$$

e dimensionalmente, o módulo de elasticidade volumétrica é dado, no ST, por:

$$[\varepsilon] = \frac{L^3 \ FL^{-2}}{L^3} = [FL^{-2}] \quad (1.12)$$

Os fluidos podem ser classificados em dois tipos, quanto a compressibilidade:

a) FLUIDOS COMPRESSÍVEIS:

O volume varia para qualquer esforço de compressão. Assim a massa específica e o peso específico também variarão.

Como exemplo pode-se citar os GASES.

b) FLUIDOS INCOMPRESSÍVEIS:

A variação de volume é praticamente nula, mesmo quando o fluido está sujeito a elevados valores de compressão.

Como exemplo pode-se citar os LÍQUIDOS.

1.7.6 - VISCOSIDADE:

Define-se dois tipos de viscosidade:

- a) Viscosidade Dinâmica ou Absoluta, representada por “ μ ”.
- b) Viscosidade Cinemática, representada por “ ν ”.

O estudo da viscosidade, deve ser feito à partir da Lei de Newton da Viscosidade.

Considerando a figura 1.2.a abaixo, onde um certo fluido está contido entre duas placas planas:

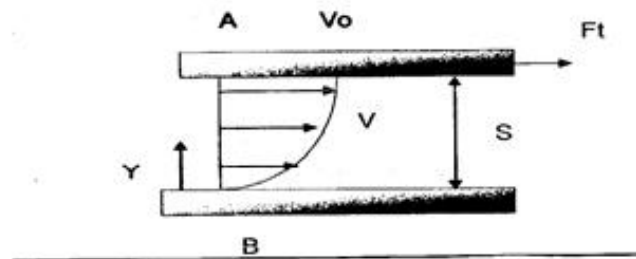


Figura 1.2.a - Lei da Viscosidade de Newton

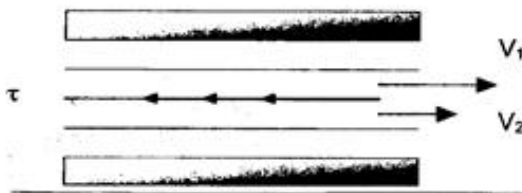


Figura 1.2.b - Lei da Viscosidade de Newton

inicialmente, a placa superior é acelerada pela força F_t , passando a velocidade de nula a um valor finito V_o . Isso mostra que a força F_t , é equilibrada por forças internas ao fluido, pois se não existe aceleração, pela Lei de Newton da Dinâmica, a somatória das forças deverá ser nula. Tal fato, provoca a seguinte questão: Como então aparecerão tais forças internas? Sendo a placa inferior fixa e a superior móvel, nota-se que ao aplicar a força

tangencial F_t na placa superior, essa irá se deslocar e os pontos correspondentes do fluido e da placa, continuam em correspondência durante o movimento. Dessa maneira os pontos do fluido em contato com a placa superior assumem a velocidade da mesma, enquanto os pontos em contato com a placa fixa ficarão juntos a ela. Esta dedução permite enunciar o chamado “ PRINCÍPIO DE ADERÊNCIA ” : “ Os pontos de um fluido em contato com uma parede sólida, possuem a mesma velocidade dos pontos desta com os quais estão em contato ”.

A resposta à pergunta formulada, é dada baseada no Princípio de Aderência. Assim o fluido junto à placa superior, se desloca com velocidade V_0 , enquanto que o fluido junto à placa inferior está com velocidade nula. As camadas intermediárias se deslocarão com velocidade variando de V_0 até zero, conforme mostra a figura 1.2.a (pág. 6). Em qualquer seção normal às placas, como por exemplo a seção AB, se formará um diagrama de velocidades, onde cada camada do fluido se desloca sobre a outra com uma certa velocidade, gerando atrito entre as camadas do fluido.

O atrito dá origem a tensões de cisalhamento entre as camadas do fluido, que multiplicadas pela área da placa fazem surgir a força interna, que como já visto, é responsável pelo equilíbrio da força externa F_t , fazendo com que a placa superior assuma a velocidade constante V_0 .

A figura 1.2.b (pág. 6) mostra a tensão de cisalhamento τ , devido a diferença de velocidade V_1 e V_2 de duas camadas adjacentes. Newton observou, que em vários fluidos a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade, ou seja, à variação da velocidade com y . Esta constatação é denominada Lei de Newton da Viscosidade e é traduzida analiticamente pela equação abaixo:

$$\tau \propto \frac{dv}{dy} \quad (1.13)$$

Os fluidos que obedecem esta Lei, são denominados Fluidos Newtonianos, tendo como exemplos: água, ar, determinados óleos. Os fluidos que não obedecem a citada Lei, são denominados Fluidos Não Newtonianos.

Assim, como a Lei de Newton da Viscosidade impõe uma proporcionalidade entre tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, é certa a existência de um coeficiente de proporcionalidade na equação 1.13. Esse coeficiente é denominado Viscosidade Dinâmica ou Absoluta “ μ ”. Podendo a equação 1.13 ser escrita sob a forma:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1.14)$$

A grandeza “ μ ” é específica de cada fluido e depende da temperatura a que o mesmo estiver exposto. Pode-se dizer, que a viscosidade nos fluidos origina-se da coesão entre as moléculas e pelos choques das mesmas. Portanto, a viscosidade não é uma propriedade visível num fluido em repouso, pois, qualquer que seja a força tangencial ele se deforma. Mas se o fluido estiver em movimento, a viscosidade age no sentido de criar condições para equilibrar a força externa F_t .

Dessa forma a viscosidade dinâmica é a propriedade dos fluidos, que permite equilibrar as forças tangenciais externas, quando os mesmos estiverem em movimento.

Unidades da viscosidade dinâmica:

$$[\mu] = M L^{-1} T^{-2} = \text{kg/m s}^2$$

$$[\mu] = F L^{-2} T = \text{kgf s/m}^2$$

Nos líquidos a viscosidade dinâmica diminui com o aumento da temperatura, ao passo que nos gases a viscosidade dinâmica aumenta com o aumento da temperatura.

A equação 1.14 pode ser simplificada, se a variação de “v” com “y” for considerada linear. A partir da figura 1.3.a, nota-se que um aumento de “dy” implica um aumento de “dv”. Quando a distância entre as placas “s” for pequena, pode-se considerar que a variação seja linear. Assim da figura 1.3.b (pág. 9) pode-se concluir que:

$$\Delta ABC \cong \Delta MNP \quad \text{e} \quad \frac{dv}{dy} = \frac{V_o}{s}$$

ou genericamente : $\frac{dv}{dy} = \frac{\Delta v}{\Delta y}$ tornando-se a equação 1.14 (Lei de Newton da

Viscosidade) em:

$$\tau = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} = \mu \frac{V_o}{s} \quad (1.15)$$

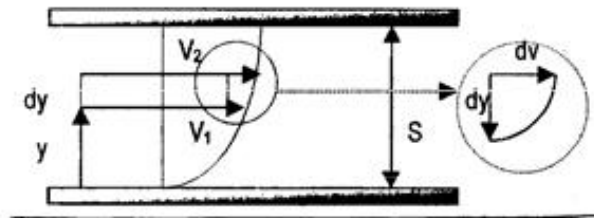


Figura 1. 3. a - Viscosidade Dinâmica

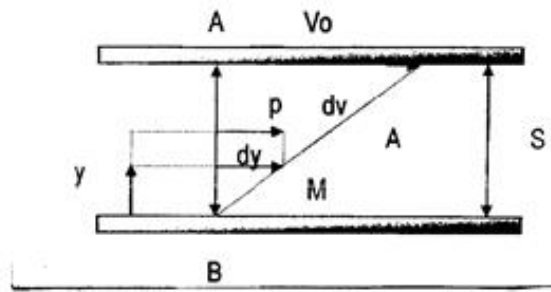


Figura 1.3 . b - Viscosidade Dinâmica

VISCOSIDADE CINEMÁTICA :

Viscosidade cinemática “ ν ” é a relação entre a viscosidade dinâmica e a massa específica.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.16)$$

A unidade da viscosidade cinemática, nos Sistemas Internacional e Técnico é m^2/s . O nome viscosidade cinemática se dá, pelo fato dessa grandeza envolver somente o tempo e o comprimento, sendo independente da força.

1.7.7 - COESÃO, ADESÃO, TENSÃO SUPERFICIAL E CAPILARIDADE:

São fenômenos devidos a forças eletroquímicas, que provocam atração recíproca das moléculas.

A coesão trata da força intramolecular, ou seja, da força que atrai uma molécula à outra, do mesmo fluido.

A adesão é a força que faz um líquido aderir a um contorno sólido (vasilha, tubo, parede, etc.).

A tensão superficial é uma força que como seu nome indica, produz efeitos de tensão na superfície dos líquidos onde os mesmos entram em contato com o ar atmosférico, ou um contorno sólido. A origem dessa força é a coesão intramolecular e a força de adesão do líquido ao sólido.

Na superfície de contato entre o líquido e o ar atmosférico, a tensão superficial se manifesta como se o líquido criasse uma fina membrana. Assim, explica-se, por exemplo, o fato de uma agulha cuidadosamente colocada na superfície da água, não afundar.

Se sobre a superfície do líquido, se traçar uma linha qualquer, a tensão superficial “ σ ” é dada pela força superficial normal à linha, por unidade de comprimento da mesma.

Dessa maneira suas dimensões são: $[\sigma] = [F L^{-1}]$. A força devida a tensão superficial é igual a $\sigma \cdot L$. Esta força é muito pequena, por exemplo, na superfície de contato com o ar atmosférico, ao longo de uma linha de 60m, a força total devida à tensão superficial não chega a 0,5 kgf.

A tensão superficial explica os fenômenos de formação de menisco e da elevação de líquidos em tubos capilares (capilaridade). A figura 1.4.a mostra a forma que a superfície da água adquire, quando em contato com um vidro. A figura 1.4.b mostra a forma que o mercúrio adquire, quando em contato com um vidro. No mercúrio a força de coesão é maior que a adesão com o vidro e ao contrário ocorre com a água. Um exemplo comum do fenômeno de adesão, é o fato da água molhar o vidro (adesão entre ambos é maior que a coesão molecular da água), o que não ocorre com o mercúrio (coesão maior que a adesão). A capilaridade é uma consequência da tensão superficial. Mergulhando tubos de pequeno diâmetro, ou placas afastadas, em um líquido em contato com o ar atmosférico, a superfície do líquido junto à parede deixa de ser plana, para se tornar côncava e elevada, se o líquido molha as paredes (água e vidro) como mostra a figura 1.4.c. Por outro lado se torna convexa e deprimida, se o líquido não molha (mercúrio e vidro) como mostra a figura 1.4.d. A equação 1.17 fornece a ascensão ou depressão num tubo:

$$h = \frac{4 \sigma \cos \alpha}{\gamma \varphi} \quad (1.17)$$

onde:

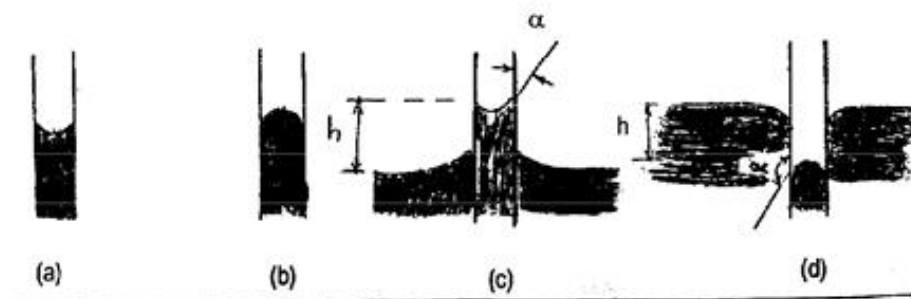
h é a ascensão ou depressão (m)

α é o ângulo formado pela superfície do líquido com a parede do tubo φ

é o diâmetro do tubo ou distância entre as placas planas (m)

Para a água e o mercúrio em contato com o ar atmosférico e o vidro α vale $25^{\circ}32'$ e $128^{\circ}52'$ respectivamente. Entre duas placas planas, o valor de h é a metade do indicado pela equação 1.17.

A elevação ou depressão capilar é inversamente proporcional ao diâmetro do tubo ou ao afastamento das placas, sendo o produto " $h \cdot \varphi$ " constante (Lei de Jurin-Borelli). Para água a 0°C , o produto " $h \cdot \varphi$ " vale 31, para " h " e " φ " em milímetros.



Figuras 1. 4 - Tensão Superficial e Capilaridade

1.7.8 - ISOTROPIA:

Os esforços sobre os pontos de uma mesma superfície, de um líquido em repouso, se distribuem por igual em todas as direções.

1.8 - PRESSÃO DE VAPORIZAÇÃO:

Na superfície livre de um líquido a qualquer temperatura, há um constante movimento de moléculas que escapam da superfície, ou seja, o líquido se evapora. Se o líquido se encontra em um recipiente fechado e sobre sua superfície há um espaço livre, este espaço estará saturado de vapor e o líquido não se evaporará mais. Se a temperatura aumentar, a pressão de saturação aumentará e se evaporará mais líquido. Quer dizer, todo fluido tem para uma dada temperatura uma pressão de saturação de vapor a essa temperatura. Da mesma maneira a cada pressão corresponde uma temperatura de saturação de vapor.

1.9 - FLUIDO IDEAL OU PERFEITO:

Na Mecânica dos Fluidos, se define fluido ideal ou perfeito como sendo aquele com Viscosidade Nula. Fluido ideal ou perfeito não existe, pois todo fluido real tem viscosidade diferente de zero. Trata-se de uma hipótese simplificadora, análoga a do gás perfeito da Termodinâmica, que visa facilitar a dedução matemática das equações básicas da Hidrodinâmica.